

文章编号: 1002-0268 (2001) 04-0012-04

高等级公路液化地基强夯法收锤标准

邱 钰, 刘松玉, 黄 卫
(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 根据高速公路工程液化地基强夯加固试验的实测数据, 对高等级公路液化地基的收锤标准进行了分析, 研究表明: 用孔隙水压力、地基中侧向位移、夯沉量作为收锤标准控制指标, 能取得一致。鉴于高等级公路地基处理特点, 采用夯沉量来作为收锤标准控制指标, 简单易行。
关键词: 强夯法; 液化; 收锤标准
中图分类号: U416.1 **文献标识码:** A

Criterion of Stopping Tamping for Dynamic Consolidation Treatment of Liquefied Foundation of Expressway

QIU Yu, LIU Song-yu, HUANG Wei
(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China)

Abstract: According to meticulous analysis of the field test data of liquefied expressway foundation treated by the dynamic consolidation, the criterion of stopping tamping is discussed in this thesis. The result indicates that the three criterions are coincidental using pore water pressure, horizontal displacement and settlement as the control data. In view of the features of the foundation treatment of the expressway, the criterion is easily put into practice using settlement as the control data.
Key words: Dynamic consolidation; Liquefaction; Criterion of stopping tamping

0 引言

强夯法处理地基是将重锤(100~400kN)从高处自由落下(落距6~40m),给地基施以强大的冲击力和振动,从而提高地基土的强度或抗液化能力,降低其压缩性。强夯法由于其施工简单、快捷、经济等特点,现已广泛的应用于工业与民用建筑、公路和铁路、机场跑道及码头的地基加固中。强夯法从提出到今天,经过了30年的发展与应用,它已适用于加固碎石土、砂土、粘性土、杂填土、湿陷性黄土等多类地基。

用强夯法加固松软地基,一般要根据现场的工程地质条件和工程的使用要求,正确的选用多个强夯参数与施工工艺,才能达到有效加固与经济的目的。其中单点夯击能、最佳夯击能的确定将直接影响强夯的加固深度与效果。

由于土性复杂性,使强夯参数与施工工艺的选择较为复杂,本文将从强夯法加固机理与工程实测出发,对强夯加固高等级公路液化地基的收锤标准进行探讨。

1 强夯法的加固机理

关于强夯法的加固机理,国内外专家学者曾进行了大量研究,目前的看法不一。Leon曾指出^[1]:由于土类的复杂性,不可能建立一种对各类地基具有普遍意义的强夯加固理论。在考虑加固机理时,需将非饱和土与饱和土分开来讨论,对饱和土而言,需考虑粘性土与非粘性土。

在第十届国际土力学和基础工程会议上(1981),Mitchell指出:当强夯法应用于非饱和土时,压密过程基本上同实验室中的击实法(普氏击实法)相同,在饱和和无粘性土的情况下,可能会产生液化,压密过

程同爆破和振动压密的过程相似。他认为：强夯对饱和和细颗粒土的效果尚不明确，成功与失败的例子均有报道。对于这类饱和和细颗粒土，需破坏土的结构，产生超孔隙水压力以及通过裂隙形成排水通道，孔隙水压力消散，土体才会被压密。颗粒较细的土达不到颗粒较粗的土那样的加固程度。软粘土层和泥炭土由于其柔性阻止了邻近的无粘性土的充分压密。

对于饱和细粒土，一般认为，地基经强夯后，其强度提高的过程可分为以下4个阶段：

- (1) 夯击能量转化，同时伴随强制压缩或振密（包括孔隙水压力的上升）；
- (2) 土体液化或土体结构的破坏（表现为土体强度的降低或抗剪强度的丧失）；
- (3) 排水固结压密（表现为渗透性能的改变，土体裂隙发展，土体强度的提高）；
- (4) 触变恢复并伴随固结压密（包括自由水变为薄膜水，土体强度提高）。

其中第一阶段是瞬时发生的。第四阶段是在强夯终止后很长时间才能达到的（可长达几个月以上）。中间两阶段则介于前述二者之间。

从强夯后土体强度提高的过程可见，土体强度提高的关键在于土体中水的排出与超孔隙水压力的消散。需指出的是，Menard 针对饱和和粘性土提出的动力固结模型中假设，在强夯与强夯后强度恢复过程中，土中的渗透性是改变的。其原因为夯击时土中应

力场变化，当土中某点的拉应力大于土体的抗拉能力时，该点出现裂隙。众多的裂隙使土体中形成树枝状的排水网路，孔隙水得以逸出。

图1为土的渗透系数与液化度关系曲线。从图中可见，当液化度小于临界液化度 α_i 时，渗透系数比例于液化度增长，当它超出 α_i 时，渗透系数骤增，这时土体出现大量裂隙，形成良好的排水通道。这些排水面一般垂直于最小应力方向。由于夯击点成网格布置，夯击能相互叠加，所以在夯击点周围就产生了垂直破裂面，夯坑周围就出现冒水冒气现象。

按此观点，对于饱和和细粒土强夯后，土体中超孔隙水压力将较迅速的排出，但在工程实践中，有时在夯坑下处会出现橡皮土，其原因是：强夯在土体中形成的排水网路一般出现在夯坑的周围，对于夯坑下处软土，不会出现排水网路，反而由于夯击的扰动，天然粘土所具有的架空结构遭到破坏，不仅损失结构强度，而且还大幅度降低渗透性，超孔隙水压力难以消散，故出现“橡皮土”现象，其强度恢复期可长达数月之久。故对于深层饱和和粘性土，如果没有较畅的排水通道（人工附加排水板或天然夹砂层等），一般强夯后超孔隙水压力需长时间才得以消散，且达不到非粘性土那样的加固程度。图2为软粘土结构破坏后孔隙水压力的监测曲线^[2]，超孔隙水压力长达15天还没有消散。

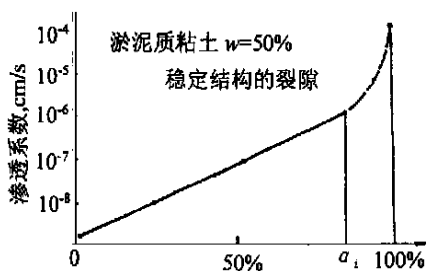


图1 土的渗透系数与液化度关系曲线

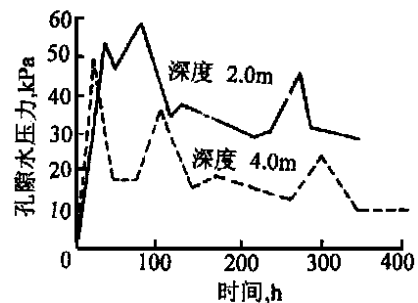


图2 土体结构破坏时孔隙水压力监测曲线

2 收锤标准试验研究

收锤标准是指强夯时每一夯点最佳锤击数的确定。至于单点夯击能是由工程要求处理深度决定。

《建筑地基处理技术规范》JGJ79-91 第5.2.3条规定：夯点的夯击次数，应按现场试夯次数和夯沉量关系确定，且应满足下列条件：

- (1) 最后两击的平均夯沉量不大于50mm，当单击夯沉能量较大时不大于100mm；
- (2) 夯坑周围地面不应发生过大的隆起；

- (3) 不因夯坑过深而发生起锤困难。

《地基处理手册》中指出：最佳夯击能的确定，一般要根据试夯得到。原则上为地基中出现的孔隙水压力达到土的自重压力时的夯击能。但对于非饱和土、饱和非粘性土，土中的孔隙水压力难以达到上覆土层的自重压力。对于非饱和土的强夯加固，与实验室中的击实类似，故在试夯时，需进行夯坑体积与四周隆起的量测，绘制夯击能与夯坑体积和隆起体积的关系曲线，根据有效压实体积来确定最佳夯击能。对于非粘性土强夯加固时，在试夯时，应进行孔隙水压

力监测，绘制最大孔隙水压力增量与夯击能的关系曲线，当孔隙水压力增量随夯击能的增加而趋于恒定时，可认为该种非粘性土所接受的能量达到饱和，此时能量为饱和非粘性土最佳夯击能。另外，对于饱和粘性土层，由于过大的夯击能会出现橡皮土现象等，强夯工艺必须进行适当的调整。

郑颖人等人通过试验提出强夯法加固软粘土地基收锤标准^[3]，标准如下：

- (1) 夯坑周围不出现明显的隆起。如果坑周出现明显隆起，标志着坑周土体已经破坏，如第一击时就出现明显隆起，则要降低夯击能。
- (2) 不能有过的侧向位移。如果有过大的侧向位移，则表明土体已经破坏。
- (3) 后一击夯沉量应小于前一击的夯沉量。如果是后一击夯沉量大于前一击的夯沉量，说明土体侧向位移较大，表明土体结构破坏。
- (4) 夯坑深度不能太深。

《规范》中的条文是针对建筑地基的，对于高等级公路液化地基强夯加固，因为是以消除液化为主，最后一锤夯沉量控制在 10cm 以下，执行较为困难。《手册》中的原则，根据孔隙水压力增量来控制，必须在土中埋设孔隙水压力计进行孔隙水压力实时检测，只能在少数试验区实现，对于高速公路地基，路线长，土层、土性多变情况，不可能全线实施。郑颖人等人提出标准时针对软粘土，夯坑深度控制在较小范围内，也比较难以实现。

鉴于以上情况，本文结合连徐高速公路（徐州段）典型液化地基试验段单点夯和试夯区的实测数据，寻找一种简单易行的收锤标准对高等级公路液化地基强夯施工进行控制。

3 试验概况与工程地质条件

连徐高速公路（徐州段）选择了典型液化地基试验段 E-5 标 K223+400 ~ K223+440 和 K225+360 ~ K225+400，E-7 标 K218+940 ~ K218+980 进行了试验分析。夯锤采用底面积 5m² 的圆形锤，锤重 20.2t。

通过夯前的补充工程地质勘察，结合交通部第一公路勘察设计院颁发的《工程地质详细勘察报告》，充分了解了试夯区主要土层情况和各试验区主要土层物理力学性质，并进行了液化势评价。图 3 为 E-7 标试验区工程地质剖面图 1。根据《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89) 对 E-7 标试验区进行液化势评价，试验区在 0~7m 深度范围内，地基液化势为中等~严重液化。

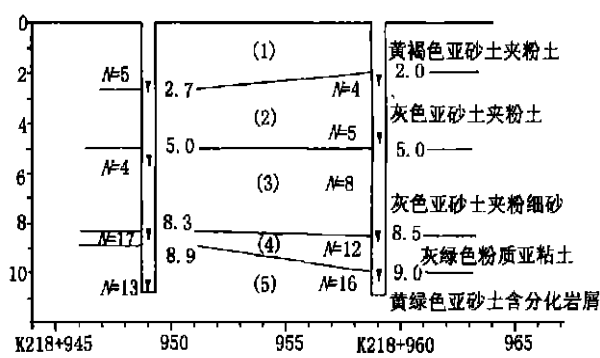


图 3 E-7 标试验区工程地质剖面图

4 试验成果分析

4.1 夯沉量变化

从图 4 可见，在主夯时，单击能量为 1500kN·m、2000kN·m 和 2500kN·m 时，每击夯沉量成减少趋势，但副夯单击能量 3000kN·m 时，第四击夯沉量比第三击有所增加，说明第四击能量过大，最佳夯击能应不大于 10000kN·m。另外，从图 4 可见，当单击能量比较大时，最后一击的夯沉量很难控制在 100mm 以内。

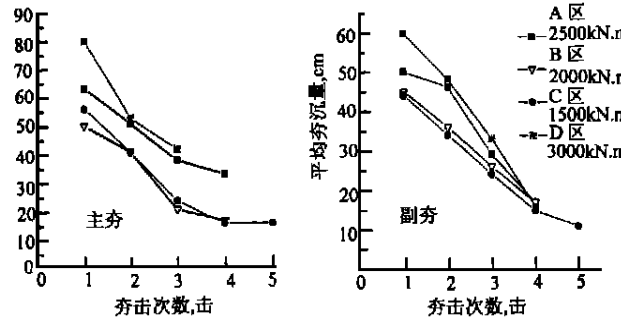


图 4 试夯区不同夯击能平均沉量与夯击次数关系对比

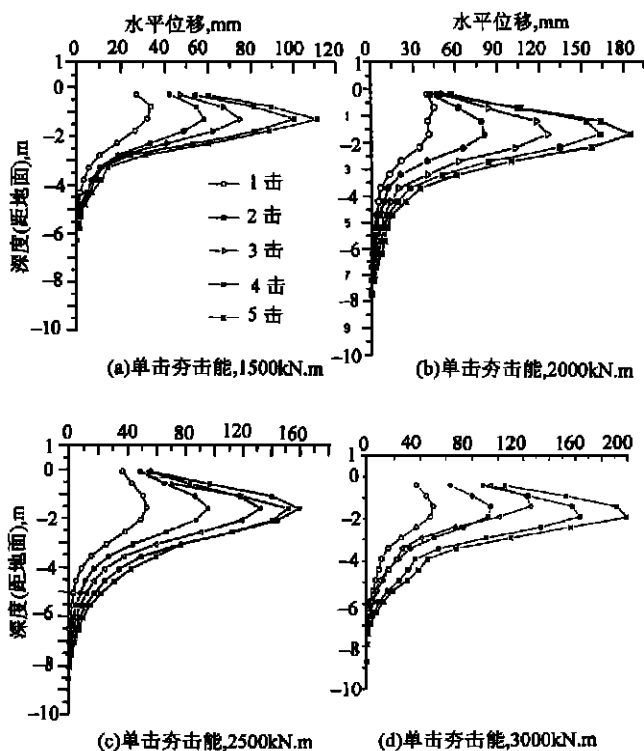
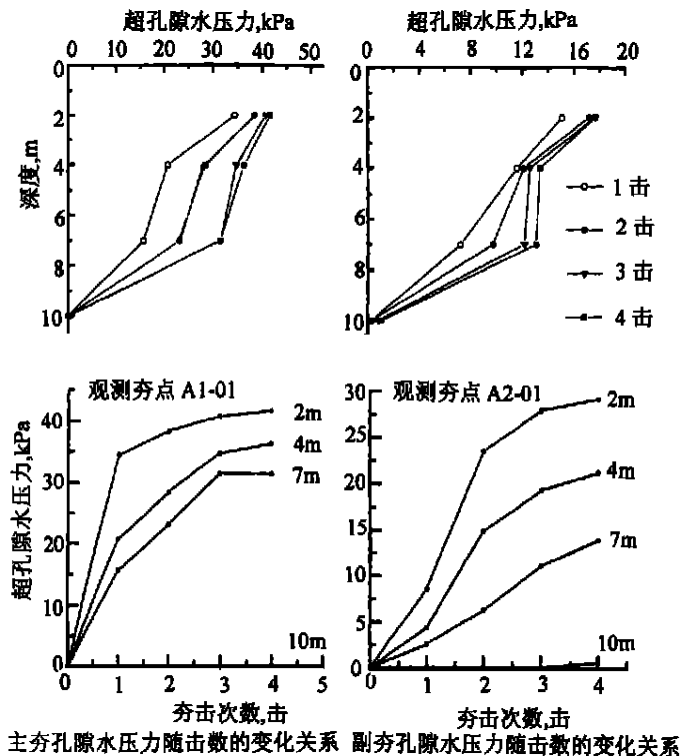
4.2 孔隙水压力

从图 5 可见，第四击时地基中的孔隙水压力增量明显减小，说明土中接受能量达到饱和，再增加能量孔隙水压力也不会有较大增长，此时夯击能为最佳夯击能。此结果与夯沉量分析结果，能较好的一致。

4.3 侧向位移

从单点夯地基中侧向位移的监测来看，如图 6 所示。在夯击能在 10000kN·m 以前，地基中水平位移随击数增加而呈减少趋势，但大于 10000kN·m 以后，地基中水平位移呈增加趋势，如单击夯击能为 3000kN·m，在第四击开始，地基中水平位移有所增加。说明此时土体结构出现破坏。

从以上夯沉量、地基中孔隙水压力、地基中侧向位移的分析中，发现用这三者来控制最佳夯击能基本上能保持一致性，但由于孔隙水压力的测量要埋设孔



隙水压力计，地基中水平位移需埋设测斜管等元件，对于高等级公路地基处理，在全线施工中难以实施。只有夯沉量测量简单易行，能在高等级公路地基处理施工中全线实行。故此用夯沉量来控制最佳夯击能，作为收锤标准控制指标。

5 结论

通过以上分析，可得到以下结论：

- ①以夯沉量、地基中孔隙水压力、地基中侧向位移来作为强夯法收锤标准控制指标，能保持一致性。
- ②对于高等级公路地基处理，用孔隙水压力、侧向水平位移作为强夯法收锤标准控制指标，在全线施工中难以实施。只有夯沉量测量简单易行，能在高等级公路地基处理施工中全线实行。故此用夯沉量来控制

- 制最佳夯击能，作为收锤标准控制指标。
- ③对于高等级公路强夯法收锤标准，采用夯沉量来控制，其如下：
 - 随锤击增加夯沉量应该减少，若夯沉量增加则应该降低锤击数；
 - 不因夯坑过深而发生起锤困难。

参考文献：

- [1] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册. 北京：中国建筑工业出版社，1988：215—262
- [2] 郑颖人，陆新，李学志，冯遗兴. 强夯加固软粘土地基的理论研究与工艺研究. 岩土工程学报，2000，22（1）：18—23.
- [3] 东南大学岩土工程研究所. 高等级液化地基处理与桥梁地基抗震处理技术研究总报告. 1998-12